

스노우팩에서 인공강우실험에 의한 배출수의 화학적인 분리

이정훈* · 이호진 · 함지영 · 김혜린

이화여자대학교 과학교육과

요 약

강우가 발생하였을 때 눈 속에 강우 이전에 존재하던 물과 강우로 인한 물을 각각 성분의 화학조성을 이용하여 수문분리를 시도하였다. 겨울이 지나 봄철에 눈이 한꺼번에 녹는 과정에서 강우를 동반하게 되면, 눈의 용해 작용을 촉진시켜 많은 지역에서 홍수를 유발하게 된다. 눈 속에 얼마만큼의 물을 함유하고 있었느냐에 의해서 눈 녹은 물, 즉 용설이 눈의 기저부에 도달하는 시간과 양이 달라지게 된다. 눈에 의해 수계가 충전되는 지역에서 이러한 눈에 의한 영향은 매우 중요하며, 기후변화와 함께 강우에 의한 영향에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 인공강우를 새로운 물로, 인공강우 이외의 물의 성분을 오래된 물로 규정하여 수문분리법을 수행하였다. 인공강우실험은 다른 연구 목적으로 수행된 Lee *et al.* (2008)의 자료를 이용하였으며, 두 번의 인공강우 실험 중에서 추적자 브롬이온의 회수율이 101%인 두 번째 인공강우실험을 이용하였다. 인공강우실험 이후 인공강우가 최대 84%에 이르렀으며, 시간이 지날수록 자연적인 용설에 의해 인공강우의 영향은 감소하였다. 연구기간동안 총 배출량 4153 L 중에서 인공강우와 오래된 물은 각각 63%, 37%씩 차지하였다. 인공강우 이외의 물(눈 속에 이미 존재하는 물과 눈 표면에서 자연적으로 발생하는 물)을 오래된 물로 규정하였으나, 이를 분리하기 위해서는 3성분계 수문분리법을 수행하여야 하며, 이는 새로운 추적자가 요구된다.

주요어: 스노우팩, 용설, 눈 위의 강우, 수문분리

Jeonghoon Lee, Hyo Jin Lee, Ji-Young Ham and Hyerin Kim, 2016, Chemical separation of the discharge generated by artificial rain-on-snow experiments in a snowpack. Journal of the Geological Society of Korea, v. 52, no. 2, p. 113-120

ABSTRACT: During a rain-on-snow event, chemical compositions of pre-event water that exists in a snowpack and event water that applied to the snowpack were used for hydrograph separation. In many temperate climate regions, the rain-on-snow event on the accumulated snow from winter to melting period increases the risk of spring floods. The water flow and storage in the snowpack controls the timing and magnitude of snowmelt reaching to the bottom of the snowpack. This process plays a crucial role in the watershed recharged by snowmelt and has led to increased interest in the rain-on-snow event due to climate change. Hydrograph separations was conducted assuming rain-on-snow as new water and meltwater staying in the snowpack and generated at surface as old water. The experimental data from by Lee *et al.* (2008) for solute transport was used, in particular, the second artificial rain-on-snow storm because almost 101% of bromide tracer measured in the discharge. During the study period, the measured total discharge was 4153 L and 63% and 37% of artificial rain-on-snow and old water had been measured in the discharge, respectively. We assumed water in the snowpack and naturally meltwater as old water, but three component hydrograph separation is needed to separate those two, which requires another hydrological tracer.

Key words: snowpack, snowmelt, rain-on-snow, hydrograph separation

(Jeonghoon Lee, Hyo Jin Lee, Ji-Young Ham and Hyerin Kim, Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea)

1. 서 론

물의 순환(water cycle 또는 hydrological cycle)

에서 극지역 및 산악지역에 분포하는 눈의 중요성은 최근의 기후변화(climate change)에 대한 관심으로 인해 새롭게 부각되고 있다(Lee *et al.*, 2010a; Park

* Corresponding author: +82-2-3277-3794, E-mail: jeonghoon.d.lee@gmail.com

et al., 2010; Lee, 2014). 물의 순환에서 지표면의 온도변화로 인해 가장 영향을 많이 받는 지역은 지표면이 눈 또는 얼음으로 덮혀 있는 극지역(polar region) 또는 산악지역(alpine region)이다. 이는 고체상인 눈과 얼음에서 액체상인 물로 전환하는 과정이 에너지 함수이며, 지표면이 무엇으로 덮혀 있는가에 영향을 받는 알베도(albedo)에 직접적으로 영향을 받기 때문이다(Lee *et al.*, 2015). 한반도가 위치한 중위도 지역에서는 산악지역에 분포하고 있는 눈이 겨울철과 봄철의 수자원(water resources)의 관리에 매우 중요한 역할을 할 수 있다(Williams *et al.*, 1991). 특히, 겨울동안 쌓여 있던 눈은 봄철에 한꺼번에 녹아 내리면서 수계(watershed 또는 catchment)에 홍수로 인해 큰 영향을 미치기도 한다(Singh *et al.*, 1997). 눈은 겨울동안 낮은 기온을 막아주는 절연체 기능을 하고 있으며, 봄철에 눈이 녹아 생태계 및 수계로 물과 눈 속에 있던 이온들이 이동하게 된다(Lee, 2014).

겨울이 지나 봄철에 눈이 한꺼번에 녹는 과정에서 강우가 동반(rain-on-snow, ROS)되면, 눈 표면에 태양에너지에 의한 복사열이외에 추가적인 에너지가 공급되게 된다(Lee and Ko, 2011). 이러한 추가적인 에너지는 눈의 변성작용(snow metamorphism)과 눈의 용해작용을 촉진시킨다. 이는 우기(rainy season)가 겨울인 많은 지역에서 봄철이 되었을 때, 눈이 한꺼번에 녹으면서 홍수를 발생시키는 주요 원인이 된다(Singh *et al.*, 1997). ROS와 태양복사에너지에 의해 생긴 눈 녹은 물, 즉 용설(meltwater)은 눈 속을 통과하여 (1) 눈 속에 저장될 수 있으며, (2) 하천으로의 지표면 유출을 증가시킬 수 있으며, (3) 토양층을 통과하여 지하수로 합류될 수 있다. 눈 속을 통과하는 물의 분포 또는 속도는 눈 속의 온도, 눈의 성숙도(ripeness), 눈의 입자크기(grain size) 및 눈의 수직적인 밀도분포에 의해 결정될 수 있다(Colbeck 1972; Singh *et al.*, 1997). 왜냐하면, 새로운 눈(new snow)은 오래된 눈(ripen snow)보다 물을 더 함유할 수 있기 때문이다(Colbeck, 1972). 또한, ROS에 의한 물은 눈이 녹은 물에 비해서 눈 속에서의 속도가 빠른 것으로 알려져 있다.

동위원소 수문분리법(isotopic hydrograph separation)은 Dinçer *et al.* (1970)에 의해 처음으로 제안되었으며 Sklash and Farvolden (1979)에 의해 발전되어 많은 연구에서 사용되고 발전되어 왔다

(Taylor *et al.*, 2001). Sklash and Farvolden (1979)은 하천이 지하수와 강우의 두 성분(two component mixing model)으로 이루어져 있으며, 하천에 기여하는 두 성분(강우 또는 용설과 지하수)의 안정동위원소 조성 또는 비활성추적자의 농도를 알고 있어야 한다는 가정을 바탕으로 수문분리법을 수행하였다. 전통적으로는 강우(새로운 물, new water)와 지하수(오래된 물, old water)의 산소동위원소($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$)의 조성 차이를 이용하여 두 성분이 하천에 미치는 영향을 연구하였다(Generexu, 1998). 최근에 이르러 분석기술의 발전(H-device 및 레이저 분광법)으로 인한 수소 동위원소의 분석이 용이해지면서 많은 연구에서 수소동위원소가 이용되고 있다(Lee *et al.*, 2010b).

수계의 눈이 녹아 용설이 지하수와 함께 하천을 충전시키는 시기에 눈이 지하수와 비교하여 얼마만큼 하천에 기여하는 가를 알기 위하여 전통적으로 수문분리법을 이용하여 왔다(Taylor *et al.*, 2001). 스노우팩(snowpack)에서 눈이 녹아 유출되는 성분을 새로운 물로 지하수를 오래된 물로 가정하고 새로운 물과 오래된 물의 추적자의 농도 및 동위원소비율을 이용하였다. 지역별로 차이는 있지만, 눈이 녹는 지역에서는 지하수가 용설에 비해 하천에 많은 기여를 하며, 용설은 주로 지하수의 수위를 높이는 역할을 한다. 하지만, ROS가 발생하면, 용설이 눈의 기저부(snowpack bottom)에 도달하는 시간(timing)과 양(magnitude)이 달라지게 된다. 이는 또한, 눈 속에 ROS가 있기 전에 얼마만큼의 물을 함유하고 있었느냐에 의해서도 달라지게 된다. 따라서, 본 연구의 목적은 인공강우실험(artificial rain-on-snow experiment)에 수문분리법을 적용하여 인공강우와 실험 이전의 눈 속의 물을 분리하는 것이다. 인공강우를 새로운 물로, ROS가 있기 전의 물을 오래된 물로 규정하여 수문분리법을 수행하였다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1 연구지역

이번 연구에서 대상 지역으로 선택한 Central Sierra Snow Laboratory (CSSL)는 미국 캘리포니아 소다스프링스(Soda Springs) 주변의 시에라 네바다(Sierra Nevada) 산맥의 서쪽 정상부에 위치하고 있다. 실험

Table 1. Experimental conditions from the previous works.

	Feng <i>et al.</i> , 2001	Lee <i>et al.</i> , 2008	Lee <i>et al.</i> , 2010b
Locality	Sierra Nevada, near Soda Springs, USA	Sierra Nevada, near Soda Springs, USA	Sierra Nevada, near Soda Springs, USA
Elevation [m a.s.l.]	2100	2100	2100
No. of events	3	2	2
Input [mm]	240 (total)	460 (total)	460 (total)
Duration [min]	90 - 270	306 - 330	306 - 330
Tracer	Tm, Yb, Lu	F ⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ²⁻	D, ¹⁸ O
Affected area	6 × 3 m ²	6 × 3 m ²	6 × 3 m ²
Snowpack depth [cm]	135	210	210
Time lag [min]	45 - 90	110 - 130	110 - 130
Total discharge [mm]	330	336	336
Grain size/ Snow type	well ripe	-	-
Infiltration front speed [cm/min]	1.4 - 2.9	1.6 - 1.9	1.6 - 1.9
Bulk density [g/cm ³]	0.42 ± 0.044	0.35 ± 0.14 (before 1. event) 0.39 ± 0.1 (after 1. event) 0.43 ± 0.07 (after 2. event)	0.35 ± 0.14 (before 1. event) 0.39 ± 0.1 (after 1. event) 0.43 ± 0.07 (after 2. event)
Purpose	Solute transport in snow	Solute transport in snow	Isotopic evolution of meltwater

부지인 CSSL은 서부지역 기후센터(Western Regional Climate Center)에서 운영하고 있으며, 해발 고도 2,100 m에 위치하며, 연평균 강수량 1,300 mm(강설량 10.4 m, 최대 적설 높이 2.4 m)이고 연평균 최고 26°C와 -10°C를 나타내었다(Lee *et al.*, 2008, 2010a, 2010b). CSSL은 소나무로 둘러싸인 0.5 ha 면적의 공터이며, 연간 강수량의 평균 80% 정도가 눈으로 내리고 있어 눈과 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다(Feng *et al.*, 2001; Taylor *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2008, 2010b; Lee and Ko, 2011).

CSSL에서는 눈과 관련된 변수들(온도, 강수 및 강설량, 장단파에너지 복사량, 풍속, 풍향 및 습도)을 지속적으로 측정하고 있다. CSSL에는 용설을 채집하기 위한 두 개의 팬(melt pan; 6 m × 3 m)이 설치되어 있으며, 이번 실험에서는 북쪽의 한 개의 팬만을 이용하였다. 시료 채취팬은 용설이 배수되어 모일 수 있도록 모서리가 완만하게 기울어져 있으며

유출되는 용설의 양은 4 L의 격측식 우량계(tipping bucket)를 이용하여 측정되었다. 격측식 우량계는 데이터 기록장치가 구비된 작은 오두막(hut) 안에 설치되어 있으며 시료채취 팬과는 8 m 길이의 PVC 파이프에 의해 지하로 연결되어 있다(Lee and Ko, 2011).

2.2 인공강우실험

연구부지인 CSSL에서 2002-2003년 겨울기간(2002년 11월 1일부터 2003년 5월 31일까지) 동안에 실시한 인공강우실험에 대한 연구결과는 Lee *et al.* (2008) 및 Lee *et al.* (2010b)에 자세히 소개되어 있다. 이전 연구에서는 대기에서 유도된 용질(solute)과 불안정동위원소가 눈 속에서 어떤 거동을 보이는가에 대한 연구가 초점이었으나, 본 연구에서는 이러한 인공강우실험을 이용하여 강우가 발생하였을 때 눈 속에 있던 물과 강우에 의한 물을 분리하기 위한 연구를 수행하였다. 표 1에는 본 연구에서 필요한

제반사항을 요약하였다(Feng *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2008, 2010b). 이러한 목적을 위해 인공강우에 의해 스노우팩 속에 얼마만큼의 물이 있었는가를 알기 위해, 2003년 4월 5일과 8일에 두 차례 인공강우실험을 수행한 연구결과를 사용하였으며 본 연구를 위해 필요한 정보는 다음과 같다. 겨울기간동안 내린 총 강수의 양은 1454 mm이며, 이 중에서 74%가 눈이었다. 실험을 시작하기 직전의 눈의 높이는 210 cm이었으며, 인공강우실험동안 기온은 -5°C에서 12°C였다. 4월 5, 6, 12, 13일은 하루종일 0°C 이하의 기온을 보였다. 따라서, 자연적으로 발생하는 융설의 양은 복사에너지의 양과 온도를 고려하여 계산하였다(Lee *et al.*, 2008; Lee and Ko, 2011).

두 개의 스프링클러(sprinkler)를 스노우 팬의 양쪽, 즉 6 m가 떨어지게 설치하여 인공강우를 스노우 팬의 넓이보다 2배 정도 넓게 눈 위에 뿌렸다. 눈을 파서 인공탱크를 만들어 수돗물을 공급하여 눈 위에 뿌릴 수 있도록 만들었으며, 인공탱크의 바닥은 플라스틱 재질의 종이를 바닥에 덮개로 사용하였다. Lee *et al.* (2008)에서는 비활성추적자(conservative tracer)로 F와 Br를 각각의 인공강우실험에 사용하였지만 본 연구에서는 두 번째에 사용된 브롬이온의 결과를 이용하였다. 인공탱크 속의 물의 온도는 1°C였으며, 실제 눈 표면에 뿌려지는 물의 온도는 이보다 더 낮았을 것이라고 추정할 수 있다. 인공탱크 속의 물은 전혀 얼지 않은 것으로 관찰되었다.

20개의 컵을 눈 표면에 설치하여 단위시간당 눈 위에 뿌려지는 인공강우의 양을 질량으로 측정하여 평균을 구하였다. 인공강우실험이 끝난 후에 컵의 질량을 측정하고 이의 평균을 구하였다. 첫 번째 인공강우실험은 4월 5일 오후에 시행되었으며, 5.1시간 동안 지속되었으며 눈 위에 뿌려진 물의 양은 157 ± 15 mm (1 σ) 이었다. 두 번째 인공강우실험은 4월 8일 오전에 시작하였으며, 5.5시간 동안 지속되었으며 인공강수량은 145 ± 8.5 mm 였다. 인공강우실험기간동안은 자연적인 눈은 내리지 않았으나, 4월 12일과 13일에 10 cm 정도의 눈이 내렸다. 두 번의 인공강우가 자연강우 또는 강설보다는 양(magnitude)과 강도(intensity)의 측면에서 높게 설계되었으며, 이는 이 지역의 하루 최대치에 해당된다(Lee *et al.*, 2010b). 눈 위에 물과 함께 뿌려진 추적자인 브롬이온의 농도는 14.6 mg/L였으며, 인공강우의 추적자

농도는 이 농도로 가정하였다.

인공강우실험 이전의 스노우팩의 물리적, 화학적 성질을 파악하기 위하여, 팬 근처에 스노우팩(snow-pit)을 한 군데 파서, 표면에서 바닥까지의 눈의 온도, 밀도, 눈 속에 있는 물의 양을 측정하였다. 스노우팩에서의 눈 시료는 채취 이후 미리 세척된 바틀(bottle)에 담아 분석이 수행되기 전까지 냉동실에 보관되었다. 융설은 발생하는 물의 양을 계산하여 시기별로 다르게 채취하였다. 음이온분석은 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였으며, 정밀도는 2% 내외였다.

2.3 수문분리법

본 연구에서는 기존의 수문분리법을 인공강우와 눈 속에 있는 물을 분리하기 위하여 적용하였다. 겨울철이 시작되어 눈이 쌓이기 시작하고, 눈 표면에 복사에너지가 전달되게 되어 눈 표면의 온도가 0°C가 넘게 되면 눈이 녹기 시작한다. 겨울동안 여분의 에너지로 인해 이러한 일이 반복되게 되면 눈 속에 물이 존재하거나 물이 얼어서 공극 속에 얼음으로 눈과 함께 존재하게 된다. 겨울에서 봄이 되면 눈의 변성작용(metamorphisms) 또는 노화(aging)가 발생하게 되어 밀도가 점점 증가하게 된다. 따라서, 겨울철의 막 내린 눈보다 봄철에 쌓여 있는 눈의 공극 속에 물이 존재할 확률이 상대적으로 높을 수 있으며 이러한 때 강우가 발생하게 되면 많은 양의 물이 수계로 공급되게 된다.

기본적으로 질량보존(mass balance) 개념을 이용하여 새로운 물(new water, nw)과 오래된 물(old water, ow)을 다음과 같은 식으로 분리할 수 있다.

$$Q_{tw} \times c_{tw} = Q_{ow} \times c_{ow} + Q_{nw} \times c_{nw} \quad (1)$$

$$Q_{tw} = Q_{ow} + Q_{nw} \quad (2)$$

$$c_{tw} = x \times c_{ow} + (1-x) \times c_{nw} \quad (3)$$

$$x = \frac{c_{tw} - c_{nw}}{c_{ow} - c_{nw}} \quad (4)$$

여기서 Q_{tw} 는 눈의 기저부(bottom)에서 측정된 배출양이며, Q_{ow} 는 기존의 눈 속에 들어 있던 물의

양이며, Q_{mv} 는 눈 위에 뿌려진 인공강우의 양이며, c 는 추적자의 농도이다. 식 1은 질량보전방정식이며, 식 2는 기저부에서의 총양은 눈 속에 들어 있던 물의 양과 인공강우의 양의 합으로 나타낼 수 있다. x 는 인공강우가 발생하였을 때 눈 속에 들어 있는 물이 전체 측정된 물의 양에 기여하는 비율이다.

3. 연구결과 및 토의

인공강우실험 결과를 그림 1에 나타내었다. Lee and Ko (2011)에서 제시한 용설계산기법을 이용하여 자연적으로 발생하는 용설의 양을 계산하여 그림 1a에 제시하였다. 일반적으로 눈이 녹기 시작하면 얼음 혹은 눈에서 물로 상이 변화될 때 에너지를 필요로 하게 된다. 이 때 필요한 에너지는 눈에 흡수된 단파 또는 장파 에너지 및 현열(sensible heat)이 있다. 눈을 녹이는 데 필요한 총에너지는 언급된 에너지의 합으로 설명할 수 있다. 만약 눈 속의 온도가 빙점 이하로 내려가게 되면 언급된 에너지가 사용되어야 하므로 예상되는 용설의 양은 적어질 수 있다. 인

공강우의 양과 시기가 그림 1a에 제시되어 있다. 그림 1b와 1c는 인공강우로 인한 눈의 기저부에서의 용설의 양의 변화와 추적자(tracer)로 사용된 브로미온(bromide)의 농도변화를 나타낸 것이다. 인공강우의 영향이 용설의 양의 변화와 브로미온의 농도변화에서 확실히 보이고 있으며, 자연적으로 눈이 녹으면서 용설의 양 및 추적자의 농도변화도 잘 보이고 있다. 두 번의 인공강우 실험 중에서 본 연구에서는 두 번째에 수행된 실험에서의 브로미온의 결과값을 사용하였다. 두 번의 인공강우 실험 중에서 첫 번째는 추적자(55%) 및 배출수(48%)를 눈의 기저부에서 회수하지 못하였다(Lee *et al.*, 2008). 이는 눈 속에서 물이 아래로 흐르지 못하고 아이스렌즈(ice lens) 등으로 인해 옆으로 흘러 회수율이 높지 못한 것으로 해석하였다. 따라서, 추적자(101%) 및 배출수(95%)의 회수율이 높은 두 번째 인공강우 실험을 이용하여 수문분리법을 적용하였다.

인공강우실험 이후 스노우팩 내의 물성변화 및 추적자의 농도변화를 그림 2와 3에 제시하였다. 인공강우실험 이후 스노우팩 내의 밀도 및 물의 함량

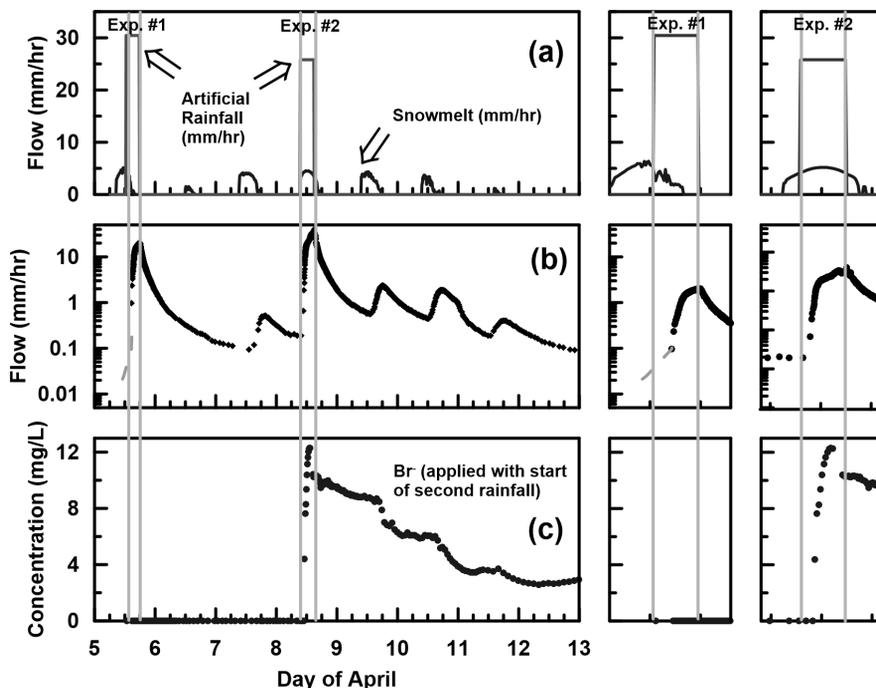


Fig. 1. Experimental observations from the two artificial rain-on-snow events. (a) Water input, including artificial rainstorms and calculated natural meltwater rates. (b) Water output. (c) Bromide concentrations from the base of the snowpack. Experimental data were from both Lee *et al.* (2008) and Lee *et al.* (2010b).

(water content)이 전체적으로 증가하였으며, 밀도의 변화보다는 물의 함량이 전체적으로 급격한 변화를 보여 주었다(그림 2). 그림 3에서는 두 번째 인공강우 실험이후 스노우팩 내에서의 브롬이온의 변화를 보여 주고 있는데, 인공강우 실험이전에는 브롬이온이 전혀 검출되지 않았다. 따라서, 수분분리법을 수행할 때 오래된 물(old water)에 해당되는 눈 속의 물과 눈이 녹아서 발생하는 물의 농도는 0.0

mg/L으로 가정하였다.

식 1, 2, 3을 이용하여 인공강우실험 이후 눈의 기저부에서 측정된 유량에서 인공강우가 차지하는 비율을 계산하여 그림 4에 제시하였다. 두 번째 인공강우 실험 이후 인공강우의 영향이 급격히 증가하여 8.55일에 최댓값 84%의 물이 인공강우에 의한 것으로 계산되었다. 그림 4에서 각각의 점들은 새로운 물의 기여도를 나타낸 것이며, 새로운 물(x)과 오래된

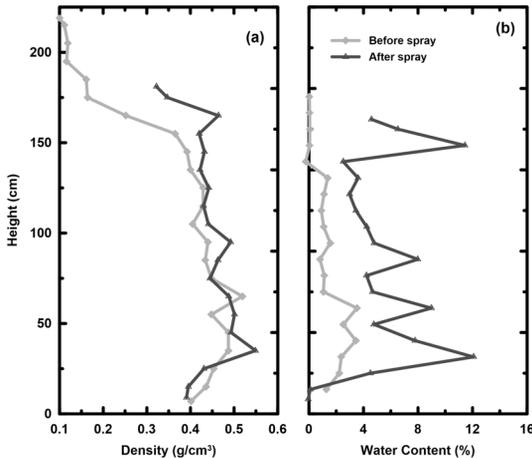


Fig. 2. The variations of density and water content before (shaded solid line) and after (black solid line) the second rain-on-snow storm. The snowpits were dug on 5 April (before the storm) and 9 April (after the storm) 2003.

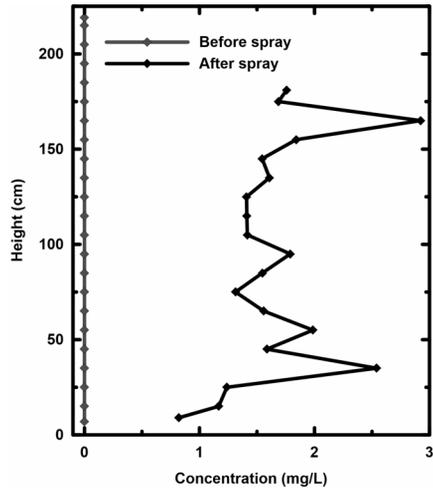


Fig. 3. Variations of chemical compositions of the snowpack collected before and after the second storm (before: grey solid line; after: black solid line).

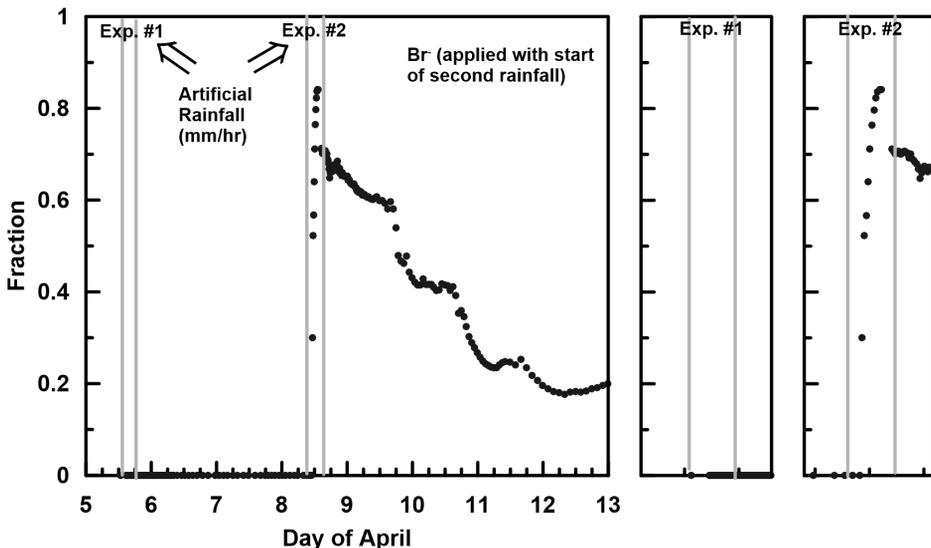


Fig. 4. Fractions of new water (artificial rainstorm) component using Br^- concentrations during the study period.

물의 값의 합은 1이므로 오래된 물은 최솟값이 16%임을 알 수 있다(오래된 물의 영향은 $1-x$). 그 이후로 인공강우(새로운 물)의 영향은 점차 줄어들면서, 오래된 물의 영향이 점차 커지는 것을 알 수 있다. 오래된 물의 영향은 눈 표면에서 눈이 녹을 때마다 증가하는 것을 알 수 있다(그림 1 참조). 최댓값까지 이르는 현상은 눈 속에서 인공강우에 의한 물이 눈 속의 채널(channel) 또는 선택적 유동(preferential flow)을 통해 눈의 기저부까지 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 Lee *et al.* (2008)에서 용질의 이동에 관해 논의한 것과 일치하는 결과이다. 눈의 용융(melting)에 의해서 발생하는 물은 본 연구의 가정에 의하면 오래된 물로 규정될 수 있다. 눈 속의 브롬이온이 없다고 가정하였기 때문에 눈이 녹을 때마다 오래된 물의 기여도가 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서는 추적자 하나를 이용한 이성분계(two component) 수문분리를 수행하였기 때문에 새로운 물과 오래된 물, 즉 인공강우와 그 이외의 물로 나뉘어진다. 따라서, 자연적으로 발생하는 용설을 다른 하나의 성분으로 고려하여 눈 속에 인공강우 이전에 존재하던 물과 분리하기 위해서는 삼성분계 이상의 수문분리를 적용하여야 하며, 이를 위해서는 다른 추적자의 적용 및 분석이 요구된다.

실제적으로 얼마만큼의 물이 눈의 기저부로 도착하였는지를 알기 위하여, 그림 4에서 계산한 기여도를 그림 1b의 기저부에서 측정된 용설의 배출량

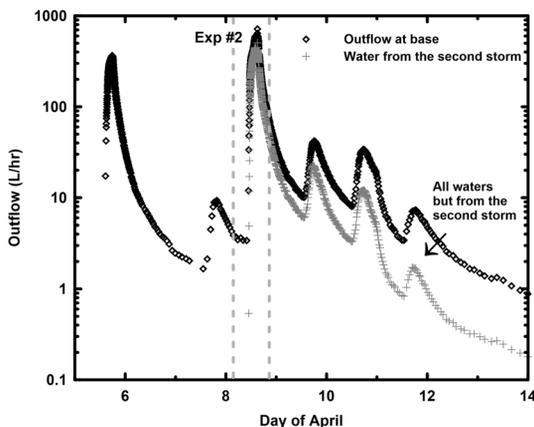


Fig. 5. Chemical separation of hydrograph generated by the artificial rainstorms. Observations of outflow were from Lee *et al.* (2008). The method was applied to the second storm.

(discharge)에 적용하였다. 두 번째 인공강우실험을 실시한 후 14일까지 배출된 총 물의 양은 4153 L이고 이 중에서 인공강우에 의해 배출된 양은 2626 L (63%)이며, 나머지는 눈 속에 이전 실험에 의해 존재했던 물과 눈 표면에서 녹은 용설의 합으로 나타낼 수 있다. 자연적으로 발생된 용설과 이전 강우실험으로 침투된 물은 다른 성분이지만 화학적으로 동일한 성분을 가지고 있기 때문에 본 연구의 수문분리에서는 분리가 되지 않았다. 앞으로 수문분리를 위한 눈에서의 추적자 실험을 한다면, 이러한 것을 고려한 추적자 선정이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

봄철에 눈에 의해 수계가 충전되는 지역에서 강우에 의한 영향과 오래된 물(눈 속에 들어 있는 물, 눈 녹은 물)의 기여도를 계산하기 위하여 Lee *et al.* (2008)과 Lee *et al.* (2010b)에서 수행한 인공강우실험의 결과를 이용하여 두 성분을 분리하였다. 두 번의 인공강우실험 중 추적자(브롬이온) 및 배출수의 회수율이 높은 두 번째 인공강우실험을 이용하여 인공강우의 추적자 농도와 눈의 농도차이를 이용한 수문분리를 수행하였다. 인공강우 실험 이후에는 새로운 물, 즉 인공강우가 최대 84%에 이를 만큼 대부분을 차지하였으나, 시간이 지날수록 눈 표면에서 자연적인 용설이 발생하면서 인공강우의 기여율은 줄어들었다. 자연적으로 발생된 용설과 눈 속에 이전에 존재하던 물과의 분리를 위해서는 새로운 추적자가 요구된다(3성분계 수문분리법). 연구기간동안 총 배출량(4153 L) 중에서 인공강우와 오래된 물은 각각 63%, 37%씩 차지하였다.

전 세계적으로 기후변화, 생태변화, 수자원확보 측면에서 눈이 물의 순환(water cycle)에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 국내에서는 아직 겨울철에 내린 눈이 수계에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구가 거의 진행되고 있지 않은 상황이다. 먼저, 겨울철에 눈이 내리는 지역에서 눈의 시공간적인 분포에 대한 이해가 필요하며, 이후 이러한 눈이 녹아 수계로 어떻게 이동하는지에 대한 연구가 필요할 것이다. 눈과 이로부터 발생하는 용설의 발생기작과 유동, 그리고 용설에 포함된 이온들이 수계 및 생태계에 어떠한 영향을 미치는가에

대한 연구가 시작되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 극지연구소의 “국내 학·연 극지진흥 프로그램(Polar Academic Program, PAP)”과 “장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측 (PM15020)”과제의 일환으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Colbeck, S.C., 1972, A theory of water percolation in snow. *Journal of Glaciology*, 11, 369-385.
- Dinçer, T., Payne, B.R., Florkowski, T., Martinec, J. and Tongiorgi, E., 1970, Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. *Water Resources Research*, 6, 110-124.
- Feng, X., Kirchner, J.W., Renshaw, C.E., Osterhuber, R.S., Klaue, B. and Taylor, S., 2001, A study of solute transport mechanisms using rare earth element tracers and artificial rainstorms on snow. *Water Resources Research*, 37, 1425-1435.
- Genereux, D., 1998, Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separation. *Water Resources Research*, 34, 915-919.
- Lee, J.H., 2014, A review on stable isotopic variations of a seasonal snowpack and meltwater. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 671-679 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., Feng, X., Faiia, A., Posmentier, E., Kirchner, J., Osterhuber, R. and Taylor, S., 2010a, Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice. *Chemical geology*, 270.
- Lee, J.H., Feng, X., Posmentier, E., Faiia, A., Osterhuber, R. and Kirchner, J., 2008, Modeling of solute transport in snow using conservative tracers and artificial rain-on-snow experiments. *Water Resources Research*, 44, W02411, doi:10.1029/2006WR005477.
- Lee, J.H., Feng, X., Posmentier, E., Faiia, A., Osterhuber, R. and Kirchner, J., 2010b, Isotopic evolution of snowmelt: A new model incorporating mobile and immobile water. *Water Resources Research*, 46, doi: 10.1029/2009WR008306.
- Lee, J.H., Han, Y.C., Ham, J.Y. and Na, U.S., 2015, A study of stable isotopic variations of Antarctic snow by albedo differences. *Ocean and Polar Research*, 37, 141-147.
- Lee, J.H. and Ko, K.S., 2011, An energy budget algorithm for a snowpack-snowmelt calculation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 82-89 (in Korean with English abstract).
- Park, Y.Y., Lee, J.Y., Choi, H.M. and Lim, H.S., 2010, A review of researches on groundwater in permafrost regions. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 429-437 (in Korean).
- Singh, P., Spitzbart, G., Hübl, H. and Weinmeister, H.W., 1997, Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: a field study. *Journal of Hydrology*, 202, 1-20.
- Sklash, M.G. and Farvolden, R.N., 1979, The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43, 45-65.
- Taylor, S., Feng, X., Kirchner, J., Osterhuber, R., Klaue, B. and Renshaw, C., 2001, Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*, 37, 759-769.
- Williams, M., Bales, R., Brown, A. and Melack, J., 1991, Fluxes and transformations of nitrogen in a high-elevation catchment, Sierra Nevada. *Biogeochemistry*, 28, 1-31.

Received : February 22, 2016

Revised : March 21, 2016

Accepted : March 23, 2016